

GANZAO SHEBEI SHEJI SHOUCHE

# 干燥设备设计手册

刘广文 编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 干燥设备设计手册

刘广文 编



机械工业出版社

全书共分干燥基础、气流干燥、流化床干燥、静止床干燥、喷雾干燥、热传导干燥、其他干燥设备以及干燥工程附属设备等 8 篇 46 章内容。详细介绍了各种干燥设备的结构、工作原理、理论基础、设计方法和所使用的物料。本书有近千幅插图，详细介绍了设备结构，并收集了大量的物料工业化参数、应用实例。数据翔实可靠，可直接用于工业化设计。

本书是干燥设备设计、制造单位的工程技术人员设计用书，也是各科研单位、设计院所工艺选型的参考资料。通过本书，可使化工、轻工、建材、粮食、食品、制药行业干燥设备操作人员进一步了解干燥设备的详细情况。还可作为大专院校相关专业师生教学、课程设计及毕业设计的指导用书，同时又是适合各图书馆收藏的工具书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

干燥设备设计手册/刘广文编. —北京: 机械工业出版社, 2009. 3  
ISBN 978-7-111-25875-9

I. 干… II. 刘… III. 干燥—化工设备—设计—手册 IV. TQ051.8-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 203165 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑: 卞 鸥 责任编辑: 王春雨 版式设计: 霍永明  
责任校对: 李秋荣 封面设计: 鞠 杨 责任印制: 邓 博  
北京机工印刷厂印刷  
2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 58 印张 · 3 插页 · 1992 千字  
0 001—4 000 册  
标准书号: ISBN 978-7-111-25875-9  
定价: 188.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
销售服务热线电话: (010) 68326294  
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话: (010) 68351729  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

物料的干燥有多种方式，本书中所述的“干燥”是指通过热介质传递过程的蒸发现象去除湿物料中湿分的“热力干燥”过程。

干燥设备在生产中是非常重要的单元设备，干燥多为生产的最后一道工序，对产品质量有直接影响。干燥操作是高耗能过程，因而是影响生产成本的重要因素。干燥设备投资较高，用户对干燥设备的选择十分慎重。

干燥设备的设计过程十分复杂，主要原因是干燥设备的形式复杂。常用的干燥设备近五十种，派生出的结构更是难以计数。干燥设备对物料有很强的针对性，所处理的物料更是千差万别，少有相同，更增加了干燥设备设计的复杂性。因此，干燥设备具有因人而异、因物而异、因地制宜的特点。所谓因人而异是指用户对产量、产品质量、能源种类、环保指标都有特定的标准；因物而异是指针对具体物料及产品要求进行设备及系统设计；因地制宜是指设备安装场地的自然环境不同，设计条件也不同，有些设计参数必须依据设备安装地的条件而定。

干燥设备之所以复杂，主要是因为它的非标准性，最佳的干燥设备常常是量身定做的专用设备。多年来，随着生产技术的发展，也推动了干燥技术与干燥设备的进步，新结构、新机型不断出现，全面系统介绍新型干燥设备的参考材料为业内人士所盼。

基于上述原因，作者在查阅近百部国内外干燥专著、逾千篇干燥文献的基础上，经过三年的时间，终于完成了这部《干燥设备设计手册》一书，本书旨在全面系统地介绍热力干燥设备的工作原理、结构特点及设计方法。同时，书中还收集了大量物料的工业化数据，方便读者在工程设计时使用。

本书对干燥设备按篇、章进行分类。近年来由于干燥技术的进步，干燥设备运用多种工作原理并融合了许多交叉技术，有些设备具有多种技术特征，因此很难按某一种方法进行清晰分类。另外，从不同的角度也有不同的分类结果，所以这里不硬性分类。

《干燥设备设计手册》一书得以顺利完成，要感谢我的夫人答艳坤和我的儿子刘琦珑，是他们多年如一日地承担家务劳动，使我能潜心投入此书的编写之中。也要感谢干燥界的同仁给予大力支持，他们直接或间接地提供资料，并提出许多宝贵的意见和建议。还要感谢沈阳化工研究院图书馆杜英娟高工、张璐工程师和孟一娜工程师，他们提供了大量的国内外干燥文献，才使本书的内容更加丰富。更要感谢温州市瞬达干燥设备有限公司金鹤鸣董事长和金尔克总经理，贵公司提供了大量的珍贵资料、图样，使本书能及时反映我国及世界干燥技术发展的现状。非常感谢中国干燥技术网的陈鹏等同仁，他们做了大量的文字整理工作，才使本书能顺利面世。特别感谢我国资深的干燥专家，天津科技大学潘永康教授，为此书提供了大量珍贵资料，使之内容更加丰富。

由于该书涉及干燥领域的内容十分广泛，加之作者的干燥理论水平有限，书中错误在所难免，万望干燥界的前辈同仁不吝赐教，也可以通过中国干燥技术网与作者交流。

谨以此书献给我的亲人、我的朋友，献给所有从事并热爱干燥事业的前辈和同仁们！

作 者  
于沈阳化工研究院

## 常用符号表

$A$ ——干燥面积 ( $\text{m}^2$ )	$D_i$ ——进风口直径 (m)
每秒种颗粒提供的表面积 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$D_s$ ——喷泉直径 (m)
喷嘴几何特性系数	$D_l$ ——流化床直筒直径 (m)
单振幅 (mm)	$d$ ——直径 (m)
$A_c$ ——恒速干燥床层面积 ( $\text{m}^2$ )	$d_c$ ——颗粒的分级直径 (m)
对流换热面积 ( $\text{m}^2$ )	$d_e$ ——当量直径 (m)
$A_d$ ——降速干燥床层面积 ( $\text{m}^2$ )	$d_{Gm}$ ——几何平均直径 (m)
$A_e$ ——冷却床面积 ( $\text{m}^2$ )	$d_{HM}$ ——调和平均直径 (m)
$A_f$ ——加热物料床板面积 ( $\text{m}^2$ )	$d_M$ ——质量平均直径 (m)
$A_0$ ——流化床开孔总面积 ( $\text{m}^2$ )	$d_p$ ——颗粒群算术平均直径, m
$A_R$ ——辐射传热面积 ( $\text{m}^2$ )	$d_{sm}$ ——面积平均直径, m
$A_p$ ——预热阶段床板总面积 ( $\text{m}^2$ )	$d_{vm}$ ——体积平均直径, m
$A_s$ ——面积蒸发强度 [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]	$d_{vs}$ ——沙得平均直径, m
$A_v$ ——容积干燥强度 [ $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ]	$d_L$ ——液滴直径, m
$a$ ——单位容积内粒子的传热面积 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )	$d_{max}$ ——最大颗粒直径, m
$a_s$ ——面积系数	$F$ ——设备表面积, m
$a_v$ ——体积系数	激振力, N
$B$ ——设备宽度 (m)	$F_b$ ——流体对颗粒的浮力, N
$b$ ——设备厚度 (m)	$F_r$ ——离心力, N
钢板厚度 (m)	$F_g$ ——颗粒的重力, N
$C$ ——灰体辐射系数 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ]	$F_k$ ——截面积, $\text{m}^2$
阻尼系数	$F_R$ ——颗粒对流体的阻力, N
$c_a$ ——绝干空气比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]	$F_{Ro}$ ——流体对颗粒的作用力, N
$c_d$ ——孔系数	$f$ ——摩擦因数
$c_g$ ——混合气体的比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]	$f_c$ ——自振频率, 1/s
水蒸气的比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]	$E$ ——偏心块质量, kg
$c_H$ ——空气的湿比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]	辐射能量, $\text{W}/\text{m}^2$
$c_m$ ——湿比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]	驱动频率, 1/s
$c_0$ ——绝对黑体的辐射系数, $5.675 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	$G$ ——物料处理量, $\text{kg}/\text{h}$
$c_s$ ——绝干物料比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]	物质的质量, kg
$c_w$ ——水的比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ]	弹性模量, MPa
$c$ ——干基含水率 [ $\text{kg}(\text{水})/\text{kg}(\text{绝干物料})$ ]	$G_a$ ——气体质量流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
$c_c$ ——临界含水率 (kg/kg)	气体流量, $\text{kg}/\text{h}$
$c_e$ ——平衡含水率 (kg/kg)	$G_m$ ——单位面积物料流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
$c_f$ ——自由含水率 (kg/kg)	$G_s$ ——绝干物料量, $\text{kg}/\text{h}$
$c_{rf}$ ——临界自由含水率 (kg/kg)	$G_L$ ——液体物料处理量, $\text{kg}/\text{h}$
$D$ ——设备直径 (m)	$H$ ——高度, m
抛掷指数	$h$ ——高度, m
$D_c$ ——床面直径 (m)	空气的焓, $\text{kJ}/\text{kg}$
	$h_s$ ——饱和蒸汽的焓, $\text{kJ}/\text{kg}$

## VIII 常用符号表

$h_w$ ——冷凝水的焓, kJ/kg	$Q_L$ ——雾化器孔周边长度上液体的体积流量, $m^3/s$
$h_a$ ——容积传热系数, $kJ/(m^3 \cdot h \cdot ^\circ C)$	$Q_m$ ——料液的体积流量, $m^3/s$
$h_f$ ——流化床高度, m	物料降温耗热量, kJ/h
$h_0$ ——静止床高度, m	水分蒸发耗热量, kJ/h
$h_m$ ——物料的焓, kJ/kg	$Q_z$ ——热损失, kJ/h
$h_w$ ——水蒸气的焓, kJ/kg	$Q_w$ ——流人床层与换热器表面传递的热量, kJ/h
$I$ ——辐射强度, $W/m^2$	$q$ ——热流密度, $W/m^2$
$K$ ——系数	单位耗能量, kJ/kg (水)
弹簧刚度系数, N/cm	$q_0$ ——干燥室的热量消耗, kJ/kg (水)
$K_a$ ——面积传质系数, $kg/(m^2 \cdot h \cdot \Delta x)$	$q_F$ ——面积热负荷, $kJ/(m^2 \cdot h)$
$K_V$ ——容积传热系数, $kJ/(m^3 \cdot h \cdot ^\circ C)$	$q_f$ ——蒸发水分消耗的热量, kJ/kg (水)
$k_Q$ 、 $k_v$ ——折算系数	$q_h$ ——输送设备耗热量, kJ/kg (水)
$k_w$ ——流化数	$q_k$ ——加热器对空气的加热量, kJ/kg (水)
$L$ ——设备长度, m	$q_m$ ——物料升温吸热, kJ/kg (水)
$L_a$ ——绝干空气消耗量, kg/h	$q_n$ ——干燥器内补充的热量, kJ/kg (水)
$L_c$ ——管件、阀门当量长度, m	$q_s$ ——尾气带出的热量, kJ/kg (水)
$L_g$ ——湿气体流量, kg/h	$q_v$ ——容积热负荷, $kJ/(m^3 \cdot h)$
$L_h$ ——水平直管长度, m	$q_z$ ——干燥器向周围散热, kJ/kg (水)
$L_Q$ ——斜管长度, m	$R$ ——设备半径, m
$L_v$ ——垂直管长度, m	$R_H$ ——热阻
$l$ ——蒸发 1kg 水干空气消耗量, kg (绝干空气) /kg (水)	$r$ ——设备半径, m
$M_a$ ——气体流量, kg/h	$r_c$ ——空气心半径, m
$M_m$ ——物料流量, kg/h	$r_0$ ——喷嘴半径, m
$m$ ——固气比	$S$ ——颗粒的表面积, $m^2$
设备重量, kg	传热表面积, $m^2$
$m_p$ ——润湿周边长度的质量流量, $g/(cm \cdot s)$	设备壁厚, m
$N$ ——转速, r/min	长度, m
$n_a$ ——绝干空气物质的量, kmol	$T_0$ ——热力学温度, K
$n_w$ ——水蒸汽物质的量, kmol	$t_a$ ——空气的干球温度, $^\circ C$
$p$ ——空气总压, Pa	$t_b$ ——壳体外表面温度, $^\circ C$
$\Delta p_{max}$ ——最大压降, Pa	$t_d$ ——露点温度, $^\circ C$
$\Delta p_s$ ——喷动床的压降, Pa	$t_m$ ——物料温度, $^\circ C$
$p_w$ ——水蒸汽分压, Pa	$t_0$ ——环境湿度, $^\circ C$
$p_a$ ——绝干空气分压, Pa	$t_{mw}$ ——物料湿球温度, $^\circ C$
$p_s$ ——水的饱和蒸汽压, Pa	$t_{as}$ ——空气的绝热饱和温度, $^\circ C$
$Q_a$ ——气体的体积流量, $m^3/h$	$t_w$ ——空气的湿球温度, $^\circ C$
$Q_n$ ——单位时间干燥器补充的热量, kJ/h	$U$ ——干燥速率, $kg/(m^2 \cdot h)$
$Q_d$ ——单位时间干燥必需的热量, kJ/h	$u$ ——流体速度, m/s
$Q_g$ ——单位时间尾气带出的热量, kJ/h	$u_a$ ——气流速度, m/s
$Q_c$ ——传热量, W	$u_{mf}$ ——临界速度, m/s
$Q_f$ ——辐射能量, W	$u_m$ ——颗粒速度, m/s
$Q_H$ ——燃烧值, kJ/kg	$u_d$ ——气体孔速, m/s
$Q_k$ ——单位时间加热器补充的热量, kJ/h	$u_r$ ——颗粒与气体的相对速度, m/s
	径向速度, m/s

切向速度, m/s	$\alpha_p$ ——平均传热膜系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$
$u_{\min}$ ——最小流化速度, m/s	$\delta_a$ ——压损比系数
$u_{\text{msf}}$ ——最小喷动速度, m/s	$\beta$ ——角度, (度)
$u_{\text{mf}}$ ——混合物速度, m/s	$\tau$ ——干燥时间, s
$u_{\text{mf}}$ ——临界流化速度, m/s	$\varepsilon$ ——物料层空隙率 (%)
$u_{\text{out}}$ ——带出速度, m/s	$\varepsilon_d$ ——对流系数
$u_{\text{sp}}$ ——喷管的气速, m/s	$\varepsilon_0$ ——固定床空隙率 (%)
$u_t$ ——颗粒的沉降速度, m/s	$K$ ——工质的等熵指数
$V$ ——设备容积, $\text{m}^3$	$\rho_b$ ——物料堆密度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$V_a$ ——气体的体积流量, $\text{m}^3/\text{h}$	$\rho_m$ ——物料密度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$W$ ——蒸发水量, $\text{kg}/\text{h}$	$\rho_a$ ——空气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$W_m$ ——以物料为基准的蒸发水量, $\text{kg}(\text{水})/\text{kg}(\text{物料})$	含气堆密度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$W_s$ ——以产品为基准的蒸发水量, $\text{kg}(\text{水})/\text{kg}(\text{物料})$	$\rho_g$ ——气体密度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$w$ ——物料、产品湿基含水率 (%)	$\rho_p$ ——平均堆密度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$w_c$ ——物料湿基临界含水率 (%)	$\rho_w$ ——工作堆密度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$x$ ——空气湿度, $\text{kg}(\text{水})/\text{kg}(\text{绝干空气})$	$\rho_{m \cdot a}$ ——两相流密度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$x_0$ ——环境湿度, $\text{kg}(\text{水})/\text{kg}(\text{绝干空气})$	$\rho_L$ ——液体密度, $\text{kg}/\text{m}^3$
$x_s$ ——空气的饱和湿度, $\text{kg}(\text{水})/\text{kg}(\text{绝干空气})$	$\psi$ ——空气相对湿度 (%)
$\xi$ ——压缩系数	填充系数 (%)
阻力系数	$\psi_c$ ——临界开孔率 (%)
$\lambda$ ——材料的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	$v_a$ ——干空气比体积, $\text{m}^3/\text{kg}$
波长 (mm)	$v_w$ ——水蒸汽比体积, $\text{m}^3/\text{kg}$
$\lambda_0$ ——固体在 $0^\circ\text{C}$ 时的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	$v_H$ ——湿空气比体积, $\text{m}^3/\text{kg}$
$\sigma_L$ ——表面张力, $10^{-5} \text{N}/\text{cm}$	$\nu_a$ ——气体的运动黏度, $\text{m}^2/\text{s}$
$\alpha$ ——温度系数, $1/^\circ\text{C}$	$\varphi$ ——辐射角系数
过剩系数	$\omega$ ——角速度, $\text{rad}/\text{s}$
角度, ( $^\circ$ )	$\mu_a$ ——气体的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$
表面传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	$\mu_L$ ——液体的黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$
导出辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	$\gamma_w$ ——水的汽化热, $\text{kJ}/\text{kg}$
喷嘴有效截面系数	$Re_0$ ——初始雷诺数
$\alpha_c$ ——表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$Re_r$ ——相对雷诺数
$\alpha_R$ ——辐射传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$Re_t$ ——沉降速度时的雷诺数
$\alpha_T$ ——对流辐射联合传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$Re_{t_c}$ ——临界速度下的雷诺数
$\alpha_s$ ——面积系数	注: 1. 书中出现较少的符号只在出现处作说明而未列入此表;
$\alpha_v$ ——体积系数	2. 如果书中符号与此处不符请以符号出处说明为准。
$\alpha_r$ ——径向传热膜系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	
$\alpha_t$ ——轴向传热膜系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$	

# 目 录

前言	
常用符号表	
第一篇 干燥基础	1
第一章 干燥工程概论	1
第一节 干燥技术概述	1
第二节 干燥设备的应用	5
第三节 干燥设备设计程序	9
第四节 干燥设备的设计方案	11
第二章 物料干燥技术	18
第一节 物料的性质	18
第二节 粉粒体物料的基础知识	24
第三节 物料衡算及热量衡算	26
第三章 空气	34
第一节 空气的性质	34
第二节 湿空气的焓湿图、温湿图	39
第三节 特殊空气干燥过程	47
第二篇 气流干燥	54
第四章 气流干燥基础	54
第一节 气流干燥简介	54
第二节 颗粒在气流干燥器中的传热	58
第三节 气流干燥器的设计	60
第五章 直管气流干燥器	66
第一节 直管气流干燥器设计基础	66
第二节 直管气流干燥器的设计	68
第三节 直管气流干燥器的工业应用	72
第六章 脉冲气流干燥器	86
第一节 脉冲气流干燥力学基础	86
第二节 脉冲气流干燥器的计算	89
第七章 旋转闪蒸干燥机	97
第一节 旋转闪蒸干燥机概述	97
第二节 旋转闪蒸干燥机的设计基础	105
第三节 旋转闪蒸干燥机的设计	108
第四节 旋转闪蒸干燥机的工业应用	113
第八章 气流旋转干燥器	121
第一节 旋风气流干燥器	121
第二节 旋风气流干燥器的设计及应用	123
第三节 旋转气流干燥器	130
第四节 涡流气流干燥器	134
第五节 螺旋板干燥器	138
第九章 粉碎气流干燥机	141
第一节 笼型粉碎干燥机	141
第二节 强化气流干燥机	145
第三节 粉碎气流干燥机	158
第十章 其他气流干燥器	168
第一节 环形气流干燥器	168
第二节 倒锥管气流干燥器	172
第三篇 流化床干燥	177
第十一章 流化床干燥基础	177
第一节 流化床干燥器概述	177
第二节 流化床干燥基础知识	184
第三节 颗粒流体力学	189
第十二章 卧式流化床干燥器	193
第一节 卧式流化床干燥器设计基础	193
第二节 卧式流化床干燥器设计	200
第十三章 圆筒式流化床干燥器	210
第一节 圆筒式流化床干燥器工艺设计	210
第二节 多层圆筒式流化床干燥器	217
第三节 圆形流化床干燥器的工业应用	225
第十四章 振动流化床干燥机	232
第一节 振动流化床干燥机概述	232
第二节 振动流化床干燥机的设计理论	239
第三节 振动流化床干燥机的设计	244
第四节 振动流化床干燥机的工业应用	250
第十五章 移动床及涡轮干燥器	256
第一节 角状盒型移动床干燥器	256
第二节 孔板型移动床干燥器	261
第三节 涡轮式干燥器	264
第十六章 多层流化床干燥机	273
第一节 多层振动流化床干燥机	273
第二节 多层圆盘振动流化床干燥机	278
第三节 螺旋振动流化床干燥机	280
第四节 多层往复输送振动干燥机的设计	282
第十七章 内加热流化床干燥器	284
第一节 内加热流化床干燥器简介	284
第二节 内加热流化床的设计	288
第三节 内加热流化床干燥器的应用	294
第十八章 喷动床干燥器	298
第一节 喷动床干燥器设计基础	298
第二节 喷动床干燥器工艺设计	304



第三节	喷动床的工业应用	308	第三节	压力式喷雾干燥工艺设计	471
<b>第十九章</b>	<b>惰性载体流化床干燥机</b>	311	第四节	混流式喷雾干燥器	478
第一节	惰性载体流化床干燥基础	311	第五节	压力式喷雾干燥器的工程技术	482
第二节	惰性载体流化床干燥机的传热	317	第六节	压力式喷雾干燥器的工业应用	488
第三节	振动惰性载体喷雾流化床干燥机	320	<b>第二十七章</b>	<b>气流式喷雾干燥器</b>	497
第四节	惰性载体流化床干燥机应用	324	第一节	气流式雾化器设计	497
<b>第二十章</b>	<b>特殊结构流化床干燥器</b>	330	第二节	气流式喷雾干燥器设计	505
第一节	旋转流化床干燥器	330	第三节	气流式喷雾干燥器的工艺设计	507
第二节	离心流化床干燥器	332	第四节	气流式喷雾干燥器的工业应用	511
第三节	粘稠物料流化床干燥器	335	<b>第二十八章</b>	<b>喷雾流化造粒</b>	526
第四节	振动斜板流化床干燥器	338	第一节	喷雾流化造粒基础	526
第五节	脉动流化床干燥器	339	第二节	喷雾流化造粒塔的设计	531
第六节	专用流化床干燥器	341	第三节	喷雾流化干燥器的工业应用	536
<b>第四篇</b>	<b>静止床干燥</b>	347	<b>第六篇</b>	<b>热传导干燥</b>	549
<b>第二十一章</b>	<b>带式干燥机</b>	347	<b>第二十九章</b>	<b>热传导及热辐射传热基础</b>	549
第一节	带式干燥机概述	347	第一节	热传导传热	549
第二节	带式干燥机的设计	352	第二节	热辐射传热	551
第三节	链式干燥机	362	第三节	综合传热	553
第四节	多层链式干燥机	365	第四节	设备热损失的计算	560
<b>第二十二章</b>	<b>隧道式干燥器</b>	370	<b>第三十章</b>	<b>双锥回转干燥机</b>	561
第一节	隧道式干燥器的结构	370	第一节	双锥回转干燥机的结构	561
第二节	隧道式干燥器的设计	376	第二节	双锥回转干燥机的设计	564
第三节	气流换向式隧道干燥器	383	第三节	改良型双锥回转干燥机	568
<b>第二十三章</b>	<b>箱式干燥器</b>	385	第四节	双锥回转干燥机的工业应用	571
第一节	箱式干燥器简述	385	<b>第三十一章</b>	<b>桨叶式干燥机</b>	574
第二节	箱式干燥器的制作	386	第一节	桨叶式干燥机结构简述	574
第三节	水平流箱式干燥器	389	第二节	桨叶式干燥机的设计基础	581
第四节	穿流箱式干燥器	391	第三节	桨叶式干燥机的设计计算	582
第五节	箱式真空干燥器	396	第四节	桨叶式干燥机的应用	585
第六节	木材专用干燥窑	399	<b>第三十二章</b>	<b>转鼓薄膜干燥机</b>	590
<b>第五篇</b>	<b>喷雾干燥</b>	404	第一节	转鼓干燥机概述	590
<b>第二十四章</b>	<b>喷雾干燥基础</b>	404	第二节	转鼓干燥机的设计及应用	596
第一节	喷雾干燥概述	404	第三节	薄膜干燥机	603
第二节	喷雾干燥系统设计	408	<b>第三十三章</b>	<b>耙式干燥机</b>	612
第三节	喷雾干燥设计基础	417	第一节	耙式干燥机简述	612
<b>第二十五章</b>	<b>离心式喷雾干燥</b>	422	第二节	耙式干燥机的设计	619
第一节	离心式雾化器	422	第三节	螺旋盘管式干燥机	625
第二节	离心式雾化器设计基础	428	第四节	耙式干燥机的派生结构	626
第三节	离心式喷雾干燥器的结构设计	433	<b>第三十四章</b>	<b>盘式干燥机</b>	630
第四节	离心式喷雾干燥器工艺设计	438	第一节	立式盘式干燥机	630
第五节	离心喷雾干燥器的工业应用	447	第二节	盘式干燥机的设计	634
<b>第二十六章</b>	<b>压力式喷雾干燥器</b>	456	第三节	盘式干燥机的结构设计	640
第一节	压力式雾化器	456	第四节	盘式干燥机的应用	641
第二节	压力式喷雾干燥结构设计	467	<b>第三十五章</b>	<b>振动干燥机</b>	645
			第一节	振动干燥机的特征	645

第二节 振动干燥机的设计基础	650	第二节 不同传热方法的组合	776
<b>第三十六章 管束转子干燥机</b>	652	第三节 多级气流干燥	780
第一节 管束干燥机设计原理	652	第四节 多级组合干燥系统	789
第二节 管束干燥机的传热量计算	656	第五节 特殊组合干燥工艺	793
第三节 旋转管排式干燥机	657	<b>第八篇 干燥工程附属设备</b>	796
第四节 加热管旋转干燥机	661	<b>第四十三章 热源及换热设备</b>	796
第五节 蒸汽列管式干燥机	666	第一节 热源的性质及应用	796
<b>第三十七章 真空干燥设备</b>	670	第二节 电加热器	798
第一节 真空干燥简介	670	第三节 蒸汽换热器	801
第二节 搅拌真空干燥器	672	第四节 干燥工程的节能	812
第三节 带式真空干燥机	675	<b>第四十四章 热风炉</b>	818
第四节 箱式真空干燥机	677	第一节 燃煤热风炉	818
第五节 其他真空干燥器	685	第二节 对流辐射综合传热热风炉	826
<b>第七篇 其他干燥设备</b>	692	第三节 燃气热风炉	830
<b>第三十八章 多功能型干燥机</b>	692	第四节 燃油热风炉	833
第一节 搅拌破碎型干燥机	692	第五节 导热油炉	842
第二节 对流式快速干燥机	696	第六节 植物燃料热风炉	846
第三节 锥形混合干燥机	697	<b>第四十五章 物料输送设备</b>	849
第四节 桨式混合干燥机	700	第一节 粉体输送设备	849
第五节 过滤干燥机	704	第二节 螺旋加料器的设计	866
<b>第三十九章 回转圆筒干燥机</b>	710	<b>第四十六章 通风除尘设备</b>	868
第一节 回转圆筒干燥机简述	710	第一节 旋风分离器	868
第二节 特殊结构回转圆筒干燥机	719	第二节 袋式除尘器	875
第三节 圆筒干燥机的设计基础	721	第三节 湿式除尘器	883
第四节 回转圆筒干燥机的工艺计算	727	第四节 通风机	886
第五节 回转干燥机的工业应用	734	<b>附录</b>	891
<b>第四十章 穿流回转干燥机</b>	745	附录 A 常用单位换算	891
第一节 外穿流回转干燥机	745	附录 B 各国筛网对照	895
第二节 穿流回转干燥机的设计	748	附录 C 空气的物理性质	896
第三节 内穿流回转干燥机	751	附录 D 饱和水蒸气表	897
<b>第四十一章 螺旋干燥机</b>	754	附录 E 水的物理性质	898
第一节 螺旋垂直振动干燥机	754	附录 F 湿空气的性质	899
第二节 螺旋垂直振动干燥机的设计	756	附录 G 空气含湿量、温度与密度的关系	900
第三节 螺旋管干燥机	759	附录 H 全国主要城市年平均温度及湿度表	903
<b>第四十二章 组合干燥设备</b>	763	<b>参考文献</b>	904
第一节 不同干燥方法的组合	764		

# 第一篇 干燥基础

## 第一章 干燥工程概论

### 第一节 干燥技术概述

#### 一、干燥的定义

在人类的生产和生活中经常遇到需要把某一种物体除去湿分的情况。这种物体可以是固态，也可以是液态或气态。在大多数情况下物体所含的湿分是水分，有时却是其他的成分，例如无机酸、有机溶剂等。这一除去物体中湿分的过程被称为“去湿”。人们将去湿的方法依据工作原理的不同分为若干类，干燥是其中的一类。

通常，人们把采用热物理方法去湿的过程称为“干燥”。其特征是采用加热、降温、减压或其他能量传递的方式使物料中的湿分产生挥发、冷凝、升华等相变过程与物体分离以达到去湿目的。不具备这一特征的去湿方法通常不列入干燥技术的范畴。

有的去湿手段，例如液体被加热而浓缩，虽然也具备热物理法去湿的特征，但人们习惯上不认为浓缩属干燥技术。而随着时代的发展，人们却逐渐将一些不属于热物理法的去湿新技术纳入干燥技术的范畴，例如分子筛、超临界流萃取等。所以，干燥技术的定义与范畴是一个约定俗成的，而又在不断拓展的概念。

传统的工业生产普遍采用的干燥设备主要有：厢式干燥、隧道干燥、转筒干燥、转鼓干燥、带式干燥、盘式干燥、桨叶式干燥、流化床干燥、喷动床干燥、喷雾干燥、气流干燥、真空冷冻干燥、太阳能干燥、微波和高频干燥、红外热辐射干燥等。此外在各行各业，例如谷物、水果和蔬菜、木材、茶叶、乳品、中药材等行业也有适合自身特点的专有干燥技术与设备。这些传统的干燥技术发展历史较长、成熟可靠，在全世界范围内已经得到广泛的应用。

近些年来，国际上涌现出一批新型的干燥技术。具有代表性的有：脉冲燃烧干燥、对撞流干燥、冲击穿透干燥、声波场干燥、超临界流体干燥、过热蒸汽干燥、接触吸附干燥等。这些新技术相对传统干燥技

术在机理上有一定的突破，但在工业化应用方面仍有待于完善。目前在我国这些新型的干燥技术还处于前期研究的阶段。

上述传统和新型的干燥技术构成了现代干燥技术。

#### 二、干燥技术的特点

干燥技术的应用领域广阔。面对众多的产业、理化性质各不相同的物料、产品质量及其他千差万别的要求，干燥技术发展成一门跨行业、跨学科，具有实验科学性质的技术。

通常，在干燥技术的开发及应用中需要具备三个方面的知识和技术。第一是需要了解被干燥物料的理化性质和产品的使用特点；第二是要熟悉传递工程的原理，即传质、传热、流体力学和空气动力学等能量传递的原理；第三要有实施的手段，即能够进行干燥流程、主要设备、电气仪表控制等方面的工程设计。显然，这三方面的知识和技术不属于一个学科领域。而在实践中，这三方面的知识和技术又缺一不可。

现代干燥技术虽已有一百多年的发展史，但至今还属于实验科学的范畴。大部分干燥技术目前还缺乏能够精准指导实践的科学理论和设计方法。实际应用中，依靠经验和小规模试验的数据来指导还是主要的方式。造成这一局面的原因有以下几方面：

原因之一是干燥技术所依托的一些基础学科（主要是隶属于传递工程范畴的学科），本身就具有实验科学的特点。例如，空气动力学的研究发展还要靠“风洞”试验来推动，就说明它还没有脱离实验科学的范畴。而这些基础学科自身的发展水平直接影响和决定了干燥技术的发展水平。

原因之二是很多干燥过程是多种学科技术交汇进行的过程，牵涉面广、变数多、机理复杂。例如在喷雾干燥技术领域里，被雾化的液滴在干燥塔内的运行轨迹是工程设计的关键。而液滴的轨迹与自身的体积、质量、初始速度和方向及周围其他液滴和热风的流向、流速有关。但这些参数由于传质、传热过程的

进行,无时无刻不在发生着变化。而且初始状态时,无论是液滴的大小还是热风的分布都不可能是均匀的。显然,对于如此复杂、多变的过程只凭理论计算来进行工程设计是不可靠的。

原因之三是被干燥物料的种类是多种多样的,其理化性质也是各不相同的。不同的物料即使在相同的干燥条件下,其传质、传热的速率也可能有较大的差异。如果不加以区别对待,就有可能造成不尽人意的后果。例如某些中草药的干燥,虽然同属一种药材,只因为药材产地或收获期存在区别就须改变干燥条件,否则产品质量就可能不合格。

以上三方面的原因决定了干燥技术的开发与应用要以试验为基础。但干燥技术的这些特点往往被人有意或无意地忽视。制造厂商由于缺乏试验装置或类型不全(这在我国是一个普遍存在的现象)经常回避应做的干燥实验,而用户由于不了解干燥技术的特点,也经常放弃进行必要试验的要求。其结局是装置使用效果不佳,甚至于报废。因此,建设工业干燥装置尤其是较大的装置之前,一定要进行充分的、有说服力的试验,并以试验结果作为工业装置建设的依据。这是干燥技术的特点。

### 三、干燥设备的分类

目前,已经工业化的干燥设备有多种形式,为了叙述的方便,人们总是将干燥设备分成若干类别,干燥设备的分类方法有许多,归纳起来有以下几种:

1. 按操作压力分类 按操作压力可分为常压式和真空式两类。常压干燥设备可以采用任何一种或几种形式同时传热,而真空干燥设备的特点是以传导传

热和辐射传热居多,多数以间歇生产方式为主,真空干燥设备主要处理热敏性物料和有溶剂回收的物料。

2. 按操作方式分类 按干燥设备操作方式可分为间歇操作和连续操作两类。这里应该说明的是有些干燥设备可有间歇和连续两种操作方式,而有些干燥设备只能有一种,表 1-1 是部分干燥设备的操作方式。

表 1-1 部分干燥设备的操作方式

物料输送方式	干燥操作方式	装置的种类
静置	间歇	各种箱式、微波加热式、真空冷冻式
台车输送	间歇/连续	隧道型
材料(自身)输送	连续	立式、红外线加热式
传导输送	连续	并行流、通气型、泡沫层式
下落输送	连续	多段型、涡轮型、通气型
转动输送	间歇/连续	各种转动型、超声波式、转筒型
搅拌输送	间歇/连续	搅拌式
振动输送	连续	振动型
流化床输送	间歇/连续	流化床式
空气输送	连续	气流式
喷雾输送	连续	喷雾式

3. 按被干燥物料的状态分类 常见被干燥物料状态可以分为块状、带状、粒状、膏状、滤饼状、纤维状、溶液状或浆状等,在许多情况下,物料的原始状态决定选择干燥设备的形式。表 1-2 是部分干燥设备所适应的典型物料。

表 1-2 部分干燥设备所适应的典型物料

干燥设备名称		物料状态						物料运动方式	传热方式	生产方式	产品剂型
		溶液	分散体	浆状	糊状	膏状	固状				
喷雾干燥	气流式	1	1	1	1	1	3	与热空气混合、物料在干燥设备内运动	对流	连续	粉状
	压力式	1	1		3	3	3				颗粒
	离心式	1	1	2	3	3	3				细粒
箱式干燥	3			1	1	1	物料不运动	传导、对流	间歇	块状	
旋风气流干燥	3				3	2	1	与热空气混合	对流	连续	粗粉
转鼓干燥	1	1	1	2	3	3	涂在滚筒上	传导	连续	片状	
真空耙式干燥	3				1	1	1	在干燥设备内运动	传导	间歇	粉、粒
粉碎气流干燥	3				2	1	1	与热空气混合	对流	连续	粉、粒
流化床干燥	3				3	3	1	与热空气混合、物料在干燥设备内运动	对流	连续	粒状
惰性载体干燥	2	1	1	1	1	3	涂在惰性体上	对流	连续	片、粉	
浆叶干燥	3				2	1	1	在干燥设备内运动	传导、对流	连续、间歇	粉、粒
闪蒸干燥	3				1	1	2、1	与热空气混合	对流	连续	粉状
气流干燥	3				3	2	1	与热空气混合	对流	连续	粒、粉
薄膜-气流干燥	1、2	1	2	1、2	3	3	与热空气混合	传导、对流	连续	粉状	
薄膜干燥	1、2				1、2	3	3	在干燥设备内运动	传导	连续	粗粒

(续)

干燥设备名称	物料状态						物料运动方式	传热方式	生产方式	产品剂型
	溶液	分散体	浆状	糊状	膏状	固状				
喷雾流化干燥	1	2	2	3	3	3	与热空气混合	对流	连续	颗粒
振动流化床干燥	3			3	2	1	在干燥设备内运动	对流	连续	颗粒
回转圆筒干燥	3			3	2	1	在干燥设备内运动	对流	连续	粉、粒

注：表中1—适用；2—较适用；3—不适用。

近年来，在传统干燥设备的基础上，不断引进新技术，使设备又增加了新的功能（见表1-3）。分为对流传热干燥设备、传导传热干燥设备、其他如辐射传热以及多种传热方式的干燥设备等，表1-4根据传热方式对干燥装置进行分类。

#### 4. 按传热方式分类 按干燥设备传热方式可以

表 1-3 传统和新型干燥技术

物料类型	干燥设备类型	新技术
液体悬浮液	转鼓 喷雾	惰性粒子的流化床及喷动床 喷雾式与流化床相结合 真空带式干燥机 脉动燃烧干燥机
膏状/淤泥	喷雾式 转鼓 桨叶式	惰性粒子喷动床 流化床（带物料预混） 过热蒸汽干燥机
微粒状物料	回转圆筒式 闪蒸式 流化床（热空气 或燃烧气）	过热蒸汽流化床干燥机 振动床干燥机 环形干燥器 脉动流化床干燥器 喷射干燥器 穿流转筒干燥机
薄层（铜版纸、 纸张、纺织品等）	多筒接触式干燥机 冲击式（空气）	冲击与辐射相结合的干燥机 冲击与穿流相结合的干燥机（纺织材料、棉纸） 冲击式与微波或射频干燥

表 1-4 干燥装置类型

原料状态	对流传热	传导传热	辐射传热	其他
原料静置	箱式平行 箱式通风	带盖箱式 真空/真空冷冻	带盖箱式 真空/真空冷冻	感应加热
原料移动	传送带式 平行对流 传送带式 通风对流 隧道台车 通风立式 窗口悬挂式	转鼓 转筒组合 真空传送带 冷冻台车 真空传送带 真空/冷冻传送带	红外线隧道 红外线 传送带	感应加热
原料搅拌	圆盘组合 流化床（带振动） 旋转型 快干型 通风旋转型 传导加热兼用流化床	圆盘组合 槽型搅拌 圆筒搅拌 圆锥型 带蒸汽管 旋转型 外壁加热 旋转型	—	感应加热
热风吹送	喷雾型 气流型 外壁加热气流型	真空干燥、热风吹送型	—	—

5. 按使用干燥介质的种类分类 对流传热可以分为空气、烟道气、过热蒸汽、惰性气体为干燥介质的干燥设备。传导传热可分为导热油、热水、蒸汽等。

6. 按干燥设备的传热过程分类 一种较新的分类方法，把干燥设备分为两大类、五小类。两大类是绝热干燥过程和非绝热干燥过程。绝热干燥过程又可分为两类：一是小颗粒物料干燥器，例如喷雾干燥器、气流干燥器、流化床干燥器、移动床干燥器及回

转圆筒干燥机等；二是块状物料干燥器，例如箱式干燥器中的隧道式干燥器、多层式及带式干燥机等。非绝热干燥过程又分为三小类：真空干燥、传导传热干燥、辐射传热干燥，其特点是非绝热系统。

7. 按干燥设备的结构分类 按干燥设备的结构可以分为喷雾干燥器、流化床干燥器、气流干燥器、回转圆筒干燥机、滚筒干燥机、各种箱式干燥器、带式干燥机等。表 1-5 是按设备结构分类的情况。

表 1-5 按干燥设备的结构分类

加热方式	物料状态	干燥设备类型	操作方式	热空气流动方式	处理量	
热空气加热	静置	箱式干燥器	间歇	平行流	小	
				通风		
	传送式		隧道式干燥器	连续	平行流	大
			喷嘴式干燥器		冲击流动	
			带式干燥机		通风	
			涡轮干燥机		通风	
			立式干燥机			
	搅拌式		转动、通风转动干燥机	连续	平行、通风、分散	
			槽型搅拌干燥机	连续	平行、通风	
			流化床干燥器	间歇/连续	分散	
			多段圆盘干燥机	连续	平行流	
	热空气传送		喷雾干燥器	连续	分散	
气流干燥器			连续	分散		
传导加热	静置	真空、冷冻箱式干燥器	间歇		小	
	传送	塔式干燥器	连续		小	
		多圆筒干燥机	连续			
	搅拌	槽型、圆筒搅拌干燥机（常压、真空）	间歇/连续			
水蒸气加热管束转动干燥机		连续				
其他		红外干燥机	间歇/连续			
		高频干燥机	间歇/连续			

虽然干燥设备有多种分类方法，多数情况下，人们习惯于按其结构进行分类，但仅从结构角度，有些干燥设备也无法分类，只能将这些设备单独列出，本书将以设备结构结合传热方式进行分类介绍。

四、干燥技术的进展

近年来，新的干燥技术的研究成果越来越多地见于各种技术文献中。新的干燥方法的研究也吸引了众多的研究人员，对撞流干燥、过热蒸汽干燥、冲击波干燥、超声波干燥、脉动燃烧干燥、热泵干燥、太阳能干燥等已是人们研究的热点课题。这些都是干燥领域的前沿技术。然而，这些干燥技术有的还在理论研究及实验室研究阶段，有的受使用条件的限制，有的受设备造价的限制，在短时间内还不能大量用于工业化使用中，不能不承认，现在工业生产中使用的干燥设备还以常规干燥设备以及它们的派生结构为主，因此，针对具体物料，正确合理地设计和使用干燥设备

仍是没能很好解决的问题。常规干燥设备的发展有以下几个趋势：

1. 多种传热方式并用 对流、传导、辐射传热干燥设备各有其优点和缺点。对流干燥设备生产效率高，但热效率低，而传导干燥设备热效率高但生产率低，而且设备造价较高，现在有些干燥设备采用对流、传导两种传热方式，就弥补了各自的缺点，操作也较经济，如旋转气流干燥器、槽型干燥器、内加热流化床等。

2. 多级干燥组合系统 任何一种干燥设备都有其局限性，采用多级干燥系统，可以发挥系统的最大能力，不但可以完成单一设备不能完成的干燥操作，而且还可以节约能量，降低生产成本，并可以拓展干燥系统的功能，如双级气流干燥系统、桨叶盘式干燥系统、喷雾流化干燥系统等。

3. 结合其他操作 干燥设备发展到现在，人们

更希望它有更多的功能,在干燥的同时还能完成其他单元操作,可降低能耗、缩短生产流程,能最大限度地控制产品质量,所以干燥包衣、干燥造粒、干燥粉碎、干燥混合、干燥分级以及其他操作也都捆绑在干燥设备中,这类干燥设备发展很快、形式也多种多样。

## 第二节 干燥设备的应用

所谓干燥就是通过给物料施加一定的能量使湿分(通常指水分)汽化、蒸发,从而使水分与固体分离。干燥是一种传热与传质同时发生的分离过程。

被干燥物料的状态、物理特性各不相同,对产品指标的要求也不尽相同,至今还没有能够适应所有物料的干燥装置。设计干燥装置时重要的一点是要根据具体条件,综合考虑选择相对合适的干燥设备,确定最有利且可行的形式与运转条件。

目前,工业用的干燥设备按传热方法分类有对流、传导、辐射等形式。

### 一、对流传热干燥设备的适用范围

现有的干燥设备中,最多的是采用对流传热干燥,如热空气干燥器等。空气既是载热体也是载湿体。热空气和被干燥物料接触进行热交换以蒸发水分。典型的对流干燥设备是空气悬浮干燥设备,如流化床干燥器、闪蒸干燥机、气流干燥器、喷雾干燥器、通风干燥机、流动干燥机、气流旋转干燥器、搅拌干燥机、平行流动干燥机、回转干燥机等。

实际应用时,有单机使用,也有组合机使用,还有变形机型等。气流干燥器、流化床干燥器、喷雾干燥器等都是以热空气为载热体,在干燥的同时,也完成了物料和水分的转移。此类干燥设备的特征主要是没有传动部件。

干燥粉、粒、片状物料,最普通的方式就是在颗粒表面施加热空气或气流。通过的气流对物料进行传热,使水分蒸发。蒸发后的水蒸气直接进入空气中被带走,对流干燥系统中常用的干燥介质有空气、惰性气体、直接燃烧气体或过热蒸汽等。

该方法使热空气与物料直接接触,边加热边除去水分。关键是要提高物料与热空气的接触面积,防止热空气偏流。恒速干燥期间的物料温度几乎与热空气的湿球温度相同,所以使用高温热空气也可以干燥热敏性物料。这种干燥方法干燥速率高,设备投资少,但热效率较低,下面是各种对流干燥设备的基本情况。

**1. 箱式干燥器** 是最老式的干燥设备之一。物料置于料盘中,料盘摆在架车上逐层逐排放入。用蒸

汽或电作为热源,箱内热空气可循环及部分排放,以使物料干燥较均匀。虽热效率低,但仍在大量地使用,也仍在继续制造。原因是结构简单,操作技术要求不高。但许多物料干燥时须翻盘、翻粉,热敏性物料易变色,也不适用于带溶剂物料的干燥。由于物料堆积,其内层传热、传质差,因而干燥速率低。

**2. 隧道式干燥器** 隧道式干燥器系将料盘分置于特制小车上,小车可间歇进、出隧道,提高热效率以增加产量。其他结构与箱式干燥器相似,在许多书中将其与箱式干燥器分为一类(本书亦如此)。

**3. 网带式干燥机** 网带式干燥机亦称带式干燥机。可用于干燥玉米、谷物、蔬菜等。此机装有不锈钢丝网制的传送带,物料随带移动,可分段加热。该装置以每段(一般长1.8~2m)为一单元,最长可连接至40m,每小时处理量可高达4t。恒速干燥阶段热空气温度可达130℃,排气相对湿度可达85%。

**4. 多层涡轮干燥机** 其结构为一立式圆筒,内设有若干层转盘,物料可由顶部加入,逐层落下至底部放出。热空气自底部引入,由设于圆筒中心的数个鼓风涡轮分段循环空气,并于器内壁相应高度设加热器,以补充空气的热量,提高热效率及干燥速率。但该设备不易清洗,对多品种生产及要求洁净的物料较难适应。

**5. 回转(或转窑式)干燥机** 干燥机为略带倾斜的水平圆筒,物料与热空气对流经过干燥机,是一种出现较早的机型。虽然结构比较简单,但热效率高,允许高温操作,生产能力大。现矿山或无机化工行业应用仍较多。多年来,对筒内扬料板(抄板)结构的改进,增设供热管和内套筒等,都使这种干燥机的性能不断提高,应用范围仍在扩大。多层圆筒干燥机已成功用于农产品的干燥上。

**6. 气流干燥器** 物料与热空气并流运动,使之受热干燥。为使气流与颗粒物料有较高相对速度,提高传热、传质速率,在直管基础上增加了变径,制成脉冲气流干燥器,干燥效率较直管气流干燥器要高一些。此外还有将干燥空间制成夹套圆筒,于筒上部切线进热空气及物料,中心管导出的旋风气流干燥器,可在干燥过程中持续加热空气及物料。现在有不少延长物料停留时间的改进,如涡旋式、套管式等。这类干燥器主要适应散粒、带表面水分物料的干燥。

**7. 喷雾干燥器** 将料液或悬浮液经雾化后,直接用热空气使液滴中水分蒸发获得粉粒状产品的装置。按雾化方法分类,又可分为离心式喷雾干燥器、压力式喷雾干燥器、气流式喷雾干燥器等几种基本形

式。干燥室设计中,热空气的引入方式对干燥过程的影响很大。另外,进口热空气的温度与热效率有很大关系,温度越高,热效率也越高。

**8. 闪蒸干燥机** 热空气从倒锥形底部进入,并设搅拌装置,使落下的滤饼受强烈搅拌而分散。干燥后细粉则可随气流送至旋风分离器或袋式除尘器收集。适合处理可分散滤饼或有一定黏度的物料。由于采用底部狭缝进风,因此系统阻力较大。

**9. 粉碎气流干燥机** 粉碎气流干燥机亦称强化气流干燥机。其原理大致与闪蒸干燥机相同,锥底部系切线进风,干燥室中部加料,底部设搅拌器,可不断打散滤饼或略带黏性的颗粒。较细的颗粒随气流向上运动,通过器顶的缩口与尾气一同排出。最大产量可达8t/h,已广泛应用于滤饼状物料的干燥。与闪蒸干燥机的区别主要在于底部结构及进风形式,底部有锥形结构。适应物料的黏度比闪蒸干燥器稍差一些。

**10. 流化床干燥器** 气流速度在被干燥物料颗粒群的临界速度与带出速度之间作用,使颗粒形成流化运动,从而加强两者的传热与传质,常用于精细化工及医药产品的干燥。

**11. 振动流化床干燥机** 此装置系对流化床干燥机增设使机体振动的振动源。由于可以降低操作气速,特别对粒度分布不均的物料,可使干燥速率及热效率均有提高,现已大量应用。

**12. 惰性粒子流化床干燥器** 在流化床干燥器中预先放入惰性粒子,使之流化并加热。然后喷入料液,先以惰性粒子为载体,附于表面。经干燥并因粒子流化时的撞击,而使干物料呈粉状剥落随气流逸出,再由旋风分离器或袋式过滤器捕集获得干燥产品。可以将溶液、悬浮液或浆液直接干燥成粉。

**13. 喷动床干燥器** 利用底部中心射入的气流,使圆筒内中心物料随气流向上移动,在离开料面时仍有上喷作用,而周围颗粒则相对向下移动,形成规则的循环运动,此类干燥装置常用于谷物干燥。其中心进气速度较高,可以对结团物料有一定的撕裂、分散作用。也可随气流同时喷入溶液作为颗粒包衣或造粒装置,喷动床的改进型多用于制药行业的制粒、包衣等操作。

**14. 喷雾流化造粒干燥器** 将细粉状物料先置于流化床中,在流化时喷入料液,并散布于初置细粉的表面使之逐步干燥。雾滴与粉料的黏结逐步增大颗粒至所需粒径,这种装置在化肥工业中如氯化铵、尿素造粒生产中已得到工业化应用。

## 二、传导传热干燥设备的适用范围

传导干燥也称接触干燥,对于潮湿颗粒非常适用。传导干燥设备热效率较高,蒸发的水蒸气或有机溶剂由真空泵抽出或用少量气体排出,气体是湿分的载体而不是主要的载热体,对于热敏性颗粒状物料建议用真空操作。在传导干燥设备中,桨叶干燥机适用于干燥膏状物料。

传导传热中,由夹套、搅拌器传热管等将热量供给被干燥物料,用热媒而不用热空气。代表性的设备是桨叶干燥机、圆锥搅拌干燥机、夹套和内置加热管回转干燥机、转鼓干燥机、耙式干燥机、真空带式干燥机、真空冷冻干燥机等。在对流干燥设备中,恒速干燥时的温度相当于湿球温度。而在传导传热干燥中,需要人为地创造加热面,使传热面积小而传热系数增加。这样,结构就比较复杂,设备投资较高。

真空干燥的操作费用昂贵,只是物料必须要在低温或缺氧状态下干燥,或物料在加热介质和高温下干燥会变质时,才推荐用真空干燥。如果物料允许,采用高温操作更有效,这样可以降低气体流速,减小设备体积。对于低温干燥操作,可以选择适当的低温加热或太阳能作为热源,但干燥机的体积比较大。

冷冻干燥是真空条件下干燥的一个特例。尽管升华所需要的热量比蒸发低几倍,但其他方面的动力消耗较大,故真空干燥费用还是昂贵的。

传导干燥法通过金属等界面间接传递干燥所需要的热量,干燥速率比对流干燥法低。恒速干燥期间产品温度与加热源的温度没有关系,大体与装置内气体压力的饱和温度相同。为了提高干燥速率和防止干燥不均,通常用机械搅拌或使容器本身旋转,以增加或不断更新物料的传热面。因此有必要深入研究传热机构的附着问题。干燥装置本身价格昂贵,但其特点是集尘系统的负荷小,热效率高,溶剂容易回收,总的费用比对流干燥法便宜得多。

**1. 真空干燥机** 真空干燥就是在真空条件下加热物料或给物料施加一定的能量,使水分内部扩散、内部蒸发、升华、表面蒸发,从而进行低温低压干燥的工艺,具有加热温度低、抗氧化性能好、产品含水率均匀、质量优良、工艺容易控制、应用广泛等优点。

**2. 转鼓干燥机** 转鼓干燥机又称附着干燥机、薄膜干燥机。主要结构为内部加热的水平转鼓,浆状物料以多种方式布于转鼓上,旋转时借鼓壁的加热将分布其上的料液边转动边干燥,干物料被刮刀铲下。其热效率较高,也可在真空下操作,对不易破坏的、可重溶的物料比较适宜。这种方法是使溶液、泥浆状或糊状物料附着在加热的滚筒上进行干燥,加热时间



短,热效率高,连续工作,适合中等以下的处理量。

**3. 冷冻干燥机** 将料液先冷却冻结,随后减压使冰升华而获得干物料。由于整个过程在冰点以下进行,常用于热敏物料的干燥。因真空中对冻结物料的给热比较困难,以及在减压下冷凝升华的水蒸气需要较大的制冷系统,因此干燥费用较高。冷冻高热敏性物料中的水分,并将在高真空中保持到冰点以下温度,使水分升华而与物料分离。物料中有效成分损失少,但干燥速率低。多用于生物制品、人体器官的干燥。

**4. (真空)箱式干燥器** 由于减压以后,物料所含挥发物的蒸发温度可以降低,适用于各种热敏性、氧敏性物料的干燥。此装置常为圆筒或其他可承真空操作的外壳,内以电热或热水、导热油通过加热板或加热管进行供热,适用于小批量间歇生产。

**5. 双锥形回转(真空)干燥机** 其器身略如橄榄状,两端有盖,中间设两轴以支承器身。器身有夹套以通入加热介质,操作时器身可回转,使物料与器壁经常更换接触界面,克服了热效率低的缺点。回转真空干燥机在精细化工、医药等方面已应用较广,对黏度大或在回转过程中附着性强的物料不适用。

### 三、辐射传热干燥设备的适用范围

辐射干燥机主要有远红外干燥机、高频干燥机、超声波干燥机等。

各种电磁辐射源波长在太阳光谱到微波范围内,太阳光辐射只能达到物料的表面。根据太阳辐射的波长,物料只能吸收一部分辐射。在粉粒包衣、片状、胶膜等物料的干燥中常使用红外线辐射。这种辐射可以用来加热颗粒,减少对内部传热的阻力。辐射的能量由水分子吸收,物料的干燥过程达到节能目的。但因这种干燥方式运行费用高,所以只有贵重物料才可采用。

辐射传热干燥是依靠加热板的热辐射能量达到干燥物料的目的。这类装置的关键是辐射能强的辐射加热板和选择物料容易吸收的波长。在相当长一段时期,都是用 $3\mu\text{m}$ 以下的近红外波段,但近年来,改为用有机物吸收能较高的远红外(大于 $4\mu\text{m}$ )陶瓷加热板。远红外加热表面吸收较好,所以作为涂膜的干燥效果较好。实验表明,离表面 $1\text{mm}$ 厚度之内的物料可以吸收大部分远红外能,再厚就很难做到均匀传热。

微波干燥近年来也得到了越来越多的应用,它是用微波作为电磁波直接进入导体内,使物料中的极

性分子和极性基团振动回转,经分子间的内部摩擦,在内部产生热量使水分逸出表面,达到干燥的目的。这是由电能转变为热能的过程,热效率可达到 $60\% \sim 70\%$ 。纯粹用微波干燥运转成本很高,但在减速干燥期间,当水分很难用热空气干燥和传导传热除去时,微波干燥可以作为辅助手段提高干燥速率。在冷冻干燥中,残留的冰也可以用微波干燥法除去。

**1. 远红外干燥机** 用电能产生的红外线,就会产生从表面向内部吸收渗透的效果。因此干燥速率较高,热效率也较高。但其性质与光相同,所以照射时不能留有阴影。

**2. 高频干燥机** 物料置于高频高电压的电场时就会随着水分子运动在物料内部产生均匀摩擦热。这种方法适用于厚板及导热性能差的物料的干燥,主要用于木材加工业。

**3. 超声波干燥机** 以适当频率的声波撞击物料,随着激烈的分子运动使空穴作用得以充分发挥,加快了干燥速率,适用于不耐热物料的干燥。

### 四、组合干燥设备的适用范围

组合干燥设备是两种或两种以上干燥形式的组合。对物料而言,主要以串联为主,也就是工作时物料先后通过两台或两台以上干燥机。组合干燥主要是满足某种干燥工艺的需要。众所周知,每种干燥设备都存在一定的不足之处,通过同种或两种以上机型串联工作,利用各自的优点,常能达到单台设备所不能实现的目的。近年来,广泛采用不同干燥方法、不同干燥原理的组合,组成能发挥各自特长而弥补各自缺点的干燥系统。例如直接干燥与间接干燥法并用,用间接干燥法提供干燥所需要的绝大部分热量。这样就可以提高干燥速率,设计成装置体积小,热效率高的直接与间接干燥法并用的干燥装置。

组合式干燥系统使用也越来越广泛。如喷雾干燥器和振动流化床干燥机的组合,耙式干燥机和振动流化床干燥机相结合,回转搅拌干燥机、传导搅拌干燥机、气流干燥器和流化床干燥器相结合等,目的是使产品获得较低的含水率。用喷雾干燥器一次可以获得水的质量分数在 $1\% \sim 3\%$ 之间的产品,如要求水的质量分数在 $0.3\%$ 以下,尾气温度往往需要 $120^\circ\text{C}$ 以上,热能的损失很大。同样,如对水分有进一步要求,水的质量分数低于 $0.1\%$ ,则尾气温度要求在 $130^\circ\text{C}$ 以上。为了节省热能,在设计上,一般用 $90^\circ\text{C}$ 尾气温度的喷雾干燥器,使水的质量分数达到 $2\%$ ,热回收产生的 $60^\circ\text{C}$ 热空气可以用于串联的卧式流化床干燥器,最终水的质量分数可以达到 $0.1\%$ 以下,热能可以节约 $20\%$ 。